

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ V НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ CoCrFeNiMnV_x

Шайсултанов Д.Г.

Руководитель - профессор, д.т.н. Салищев Г.А.

Белгородский государственный национальный исследовательский
университет, г. Белгород
shaysultanov@bsu.edu.ru

В работе была исследована микроструктура и механические свойства высокоэнтропийных сплавов систем CoCrFeNiMnV_x ($x=0;0,25;0,5;0,75;1$) в литом и гомогенизированном (1000°C, 24ч.) состояниях. В обоих состояниях «базовый» сплав CoCrFeNiMn имеет однофазную ГЦК структуру. Добавление V приводит к образованию в сплаве интерметаллидной сигма фазы, а повышение ее концентрации - к увеличению объемной доли сигма фазы, и в сплаве CoCrFeNiMnV сигма фаза становится матричной. Установлено, что увеличение объемной доли сигма фазы приводит непрерывному упрочнению и потере пластичности.

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭСы) – это новый класс материалов определяемые как сплавы, состоящие из 5 и более элементов в равных эквиатомных пропорциях [1]. Большинство существующих ВЭСов имеют основу из переходных металлов Co, Cr, Fe и Ni с добавлением таких элементов как Al, Cu, Mn, V, Ti, Mo и т.д. Особое внимание обращено к сплавам, в которых при определенном их сочетании образуются простые твердые растворы. В данном случае однофазная структура твердого раствора наблюдается только в CoCrFeNi и CoCrFeNiMn [2], а добавление в равных эквиатомных пропорциях Al, Cu, V, Ti, Mo и т.д. приводит к формированию упорядоченных и интерметаллидных фаз. К сожалению, причины дестабилизации твердого раствора при легировании различными элементами не вполне ясны. Однако лучшего понимания о влиянии химического состава на формирование фаз в ВЭСах можно достичь путем изучения влияния легирования «базового» сплава с однофазной структурой твердого раствора, как например CoCrFeNi и CoCrFeMnNi, с различными концентрациями элементов вызывающих образование дополнительных фаз. Такие исследования могут быть полезны не только для понимания формирования твердого раствора или упорядоченных/интерметаллических фаз в ВЭСах, но также и для создания композиций с многообещающими свойствами.

Целью данной работы является исследование влияния концентрации V на микроструктуру сплавов CoCrFeMnNiV_x и установление взаимосвязи между их микроструктурой и механическими свойствами.

Сплавы CoCrFeNiMn, CoCrFeNiMnV_{0,25}, CoCrFeNiMnV_{0,5}, CoCrFeNiMnV_{0,75} и CoCrFeNiMnV были получены методом дуговой плавки

чистых элементов при низком давлении и литьем в водоохлаждаемую медную изложницу в атмосфере чистого аргона. Для обеспечения химической однородности, слитки переплавляли не менее 5 раз. Полученные слитки имели размеры $6 \times 15 \times 60$ мм³. Сплавы были исследованы в литом состоянии и после гомогенизационного отжига при 1000°C в течение 24 часов. Перед отжигом образцы запаивались в вакуумную (10^{-2} Торр) кварцевую трубку со стружкой титана для предотвращения окисления. Микротвердость образцов измеряли с использованием 136-градусной алмазной пирамиды с нагрузкой 250 г. приложенной в течение 15 с. Испытания на сжатие проводились на прямоугольных образцах с размерами $7 \times 5 \times 5$ мм³. Начальная скорость деформации была 10^{-3} с⁻¹.

Сплав CoCrFeNiMn в литом состоянии имеет дендритную структуру. По результатам ЭДС анализа, дендритные области в литом сплаве CoCrFeNiMn отличаются повышенным содержанием элементов с высокой температурой плавления (21-22%) Co, Cr и Fe, а междендритные прослойки обогащены легкоплавкими Ni (22.9%) и Mn(26.6%). При этом, согласно данным ПЭМ, дендриты и междендритные области имеют одну и ту же ГЦК решетку. При добавлении V ($x=0,25$) сплав по-прежнему имеет однофазную ГЦК кристаллическую структуру. Установлено, что дальнейшее повышение V приводит к изменению фазового состава сплавов и усложнению их структуры. Показано, что при содержании V $x=0,5$ и $0,75$ в матрице и по границам зерен наблюдается выделение светлых частиц неправильной формы с объемной долей 20% и 37%, соответственно. Методами РСА и ПЭМ светлая фаза была определена как тетрагональная σ – фаза, содержащая повышенное количество Cr и V. Структура сплава CoCrFeNiMnV в литом состоянии состоит из зерен σ – фазы. Вторым компонентом в сплаве является ГЦК фаза, распределенная толстым слоем вдоль границ зерен и обогащенная Ni. Кроме того, внутри зерен наблюдаются мелкие выделения ГЦК фазы в виде пластин. По данным ПЭМ, частицы внутри зерен имеют ту же решетку и состав, что и фаза по границам зерен, следовательно, сплав состоит только из двух фаз.

После гомогенизации сплав CoCrFeNiMn трансформируется в зеренную ГЦК структуру. Отжиг сплава CoCrFeNiMnV_{0,25} приводит к выделению частиц (до 2%) σ – фазы предпочтительно по границам зерен. Более сложная структура наблюдается в сплаве системы CoCrFeNiMnV_{0,5}. В матрице присутствуют два типа частиц σ – фазы с одинаковым химическим составом: равноосные и линзообразные. Стоит отметить, что линзообразные частицы имеют четко определенные предпочтительные ориентации (ориентированы в трех разных направлениях, под 60° друг к другу), что подразумевает наличие кристаллографической ориентации между частицами и матрицей. Структура сплава CoCrFeNiMnV_{0,75} после отжига подобна структуре в литом состоянии. Однако в отожженном состоянии увеличивается объемная доля σ – фазы до 48%. Отжиг оказывает

существенное влияние на морфологию микроструктуры сплава CoCrFeNiMnV. В сплаве сохраняется ГЦК фаза, но вместо непрерывной “сетки” как в литом состоянии теперь наблюдаются отдельные крупные частицы со сложной формой. ГЦК частицы внутри зерен σ - фазы также становятся заметно крупнее по сравнению с литым состоянием, и приобретают достаточно равноосную форму. В отличие от всех предыдущих сплавов, в CoCrFeNiMnV матрицей является σ – фаза, обогащенная Cr (20,0%) и V (18,6%) и обедненная с Ni (13,5%), а частицы имеют ГЦК структуру, с повышенным содержанием Ni (25%). Объемная доля частиц составляет около 28%.

С повышением концентрации V наблюдается увеличение микротвердости сплавов в литом и гомогенизированном состояниях, а именно от 144 HV(V_0) до 650 HV(V_1) и от 135 HV(V_0) до 636 HV(V_1), соответственно. Проведенные механические испытания на сжатие отожженных сплавов показали, что сплавы CoCrFeNiMn и CoCrFeNiMnV_{0,25} имеют низкий предел текучести и высокую пластичность (200 МПа и 230 МПа, >75%). Добавление V ($x=0,5$) резко повышает предел прочности до 620 МПа, при этом сохраняется высокая пластичность. Более высокий предел прочности и низкая пластичность наблюдается в сплавах с высоким содержанием V. В сплавах CoCrFeNiMnV_{0,75} и CoCrFeNiMnV предел текучести возрастает до 740 МПа и 1660 МПа, а пластичность снижается до 7,8% и 0,5%, соответственно. Предел прочности сплава CoCrFeNiMnV_{0,75} составляет 1325 МПа, а сплава CoCrFeNiMnV – 1842 МПа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

4. J.W. Yeh, JOM 35 №12 (2013) 1759-1771.
F. Otto, Y. Yang, H. Bei, E.P. George, Acta Mater. 61 (2013) 2628-2638.